

高强度热轧防弹钢板 B900FD 的研究与开发

李志刚¹, 马鸣图¹, 黄镇如²

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 400039; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

[摘要] 本文研究和开发了高强度热轧防弹钢板 B900FD, 设计了合金的化学成分, 探讨了不同卷取温度对防弹钢组织、力学性能的影响; 对防弹钢板进行了枪击试验, 同时对枪击后着弹点的变形特性和组织进行了分析; 进行了加工工艺试验和焊接试验。结果表明, 高强度热轧防弹钢板 B900FD 具有优良的强韧性匹配性能, 枪击性能可以满足防弹板的要求, 其加工性能、可焊接性可以适应现有生产工艺, 同时降低了生产成本。本钢板的综合性能指标达到了《专用运钞车防护技术条件》(GA 164—2005) 的要求。

[关键词] 防弹钢板; 高强度钢; 热轧钢板

[中图分类号] TG142 **[文章标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)01-0093-06

1 前言

防弹运钞车应具有良好的防弹功能, 在遇劫匪抢劫时保证保安押运人员和现金运输的安全; 车辆的重要部位, 如电池、发动机、水箱、油箱等具有防弹功能后, 在遇枪击时, 也能保证运钞车安全行驶的功能。防弹钢板不仅用于运钞车的防护, 还应用于防暴车, 以及公安特种车辆的防护中。统计表明, 目前我国防弹车产量已超过 15 万辆^[1-3], 而这类特种车辆所用的防弹板是重要的关键材料之一。

目前防弹钢板按其生产工艺可分两大类: 一类为热轧钢板, 以瑞典 Swedish Steel AB (SSAB) 公司的 Domax Protect (Defend) 250 和 300 为代表, 这类钢板除具有良好的防弹功能外, 其加工性能、可焊性及冷弯性能良好, 其抗拉强度大于 900 MPa, 一般小于 1 000 MPa; 另一类为热处理钢板, 以瑞典 SSAB 公司的 Domax500 为代表, 这类钢板系热轧后通过热处理淬火而满足强度要求的, 其强度高, 通常大于 1 500 MPa, 但加工性能、可焊性及冷弯性能远不如热轧类钢板^[4]。

我国试制的防弹钢板多为淬火硬化钢, 板形和

加工性能不如热轧类钢板, 而热轧类防弹钢板完全被瑞典 SSAB 公司垄断, 因此研究开发具有自主知识产权的热轧类防弹钢板尤其重要。

运钞车防弹钢板要满足《专用运钞车防护技术条件》(GA 164—2005) 中 A 级防护标准。国内一般采用含高铬镍的调质热处理钢板, 但其存在强度高、成形性能和焊接性能差, 价格贵等缺点。热轧防弹钢板具有性能均匀稳定、板形好、良好的冷加工性和焊接性能, 生产成本低, 以及易于生产等优点。但是热轧防弹钢板在国内生产比较困难, 目前主要依赖国外进口, 钢板的价格高且厚度较厚, 同时在焊接时对焊条也有特殊要求。本文的高强度热轧防弹钢板 B900FD 正是为了解决防弹钢板存在的以上问题和不足而研究开发, 是基于微合金复相钢具有的优良强韧性匹配, 采用控轧技术, 实现在热轧态下供货使用, 具有优异的加工性能、可焊性, 同时价格低廉, 可替代进口防弹钢板。

2 化学成分及设计原则

虽然相变诱发塑性 (TRIP) 钢具有优良的变形能力, 但由于屈强比相对较低, 防子弹的侵切能力也相

[收稿日期] 2013-10-12

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划资助项目 (2011BAG03B06)

[作者简介] 李志刚, 1964 年出生, 男, 重庆市人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为汽车轻量化材料工艺研究; E-mail: lzgccari@126.com

对较低,且轧制工艺复杂,成本较高。而贝氏体钢或复相钢采用固溶强化、析出强化、位错强化、细晶强化等复合强化手段,可以达到所需的强度水平,热轧条件也比较容易达到。因此热轧防弹钢板B900FD的化学成分设计原则上采用贝氏体钢或复相钢。

碳含量太高将降低防弹钢的塑性并恶化焊接性能,因此应控制在不大于0.20%的范围;Si、Mn是固溶强化元素, Si含量太高易恶化钢板的表面质量,应控制在0.80%以下, Mn对塑性的影响不明显,因此可控制在2.0%以内。这样可将钢板强化

到700 MPa,但与900 MPa还有很大差距,必须加入微合金元素,用析出强化和细化晶粒等方法进一步提高钢板的强度。Ti既是析出强化又是晶粒细化元素,还能改变硫化物的形态,提高钢板的韧性,加入0.15%以下;V是析出强化元素,在低温下析出后可以有效提高铁素体基体的强度;Nb是控制轧制的有效强化元素。同时加入少量的Cr和Cu以增加钢板的耐腐蚀性,加入微量的B可进一步提高钢板的强度^[5,6]。为了提高钢板的卷取温度添加了Mo和Ni等元素。热轧防弹钢板B900FD的化学成分见表1。

表1 热轧防弹钢板B900FD的化学成分
Table 1 Chemical composition of hot rolling bulletproof steel B900FD

成分	C	Si	Mn	P	S	Ti	V+ Nb+Al	Cr	Cu	Mo	Ni	B
含量	0.15~0.20	0.60~0.80	1.5~2.0	≤0.030	≤0.030	≤0.15	≤0.070	0.20~0.30	0.20~0.30	0.15~0.20	0.15~0.25	≤0.003 0

3 金相组织

热轧防弹钢板B900FD的金相组织为铁素体+

珠光体+贝氏体,见图1。钢板头部由于轧辊温度较低,贝氏体组织增多,珠光体量减少;钢板尾部因轧辊温度升高,珠光体组织增多。

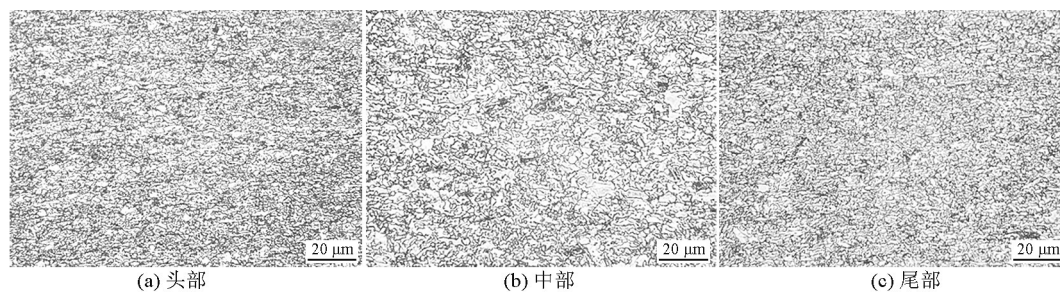


图1 热轧防弹钢板B900FD的金相组织

Fig.1 The microstructure of the hot rolling bulletproof steel B900FD

4 力学性能

4.1 弯曲试验

热轧防弹钢板不同位置的弯曲试验结果见表2。头部出现裂纹,可能是由于头部贝氏体组织较多,钢板韧性下降的原因所致。

表2 钢板不同位置的弯曲试验结果

Table 2 Bend experiment in different position of steel

位置	试验宽度/mm	试验结果	
		$d=3a, 150^\circ$	$d=3a, 180^\circ$
头部	35	完好	裂纹
中部	35	完好	完好
尾部	35	完好	完好

注: d 为弯曲半径; a 为钢板厚度

4.2 冲击试验

冲击试样为V型缺口,试验结果见表3,相应的载荷、位移曲线见图2。其屈服载荷为2.86 kN,最大载荷为7.61 kN,说明开发的防弹钢具有良好的抗冲击载荷变形能力,进而保证较大的冲击韧性(A_k 值)。

表3 冲击试验结果

Table 3 Impact test results

屈服 载荷/kN	最大 载荷/kN	失稳点载 荷/kN	失稳终止 点载荷/kN	冲击 总功/J	A_k 值 ($J \cdot cm^{-2}$)
2.86	7.61	7.36	6.79	24.39	102.99

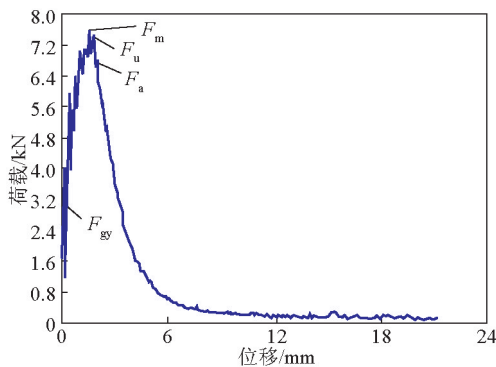


图2 冲击试验的载荷、位移曲线

Fig.2 Load vs displacement curve of impact experiment

注: F_u —失稳点载荷; F_a —失稳终止点载荷; F_{gy} —屈服载荷;
 F_m —最大载荷

4.3 拉伸试验

钢板不同位置的拉伸试验结果见表4,中部比头部、尾部具有更好的强韧性匹配。

表4 钢板不同位置的拉伸试验结果

Table 4 Strength results in different position of steel

位置	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_{50}/\%$	$R_{p0.2}/R_m$
头部	837	1 044	14.4	0.802
中部	738	878	19.4	0.840
尾部	708	858	15.8	0.825

注: R_p —屈服强度; R_m —抗拉强度; A_{50} —50 mm 标距的延伸率

5 轧制工艺

5.1 终轧温度对防弹钢性能的影响

终轧温度与强度的关系见图3,随终轧温度的升高,抗拉强度、屈服强度均下降。终轧温度与延伸率的关系见图4,随终轧温度的升高,延伸率升高。

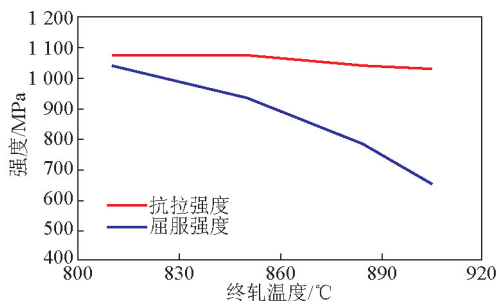


图3 终轧温度与强度的关系

Fig.3 The relationship of final rolling temperature and strength

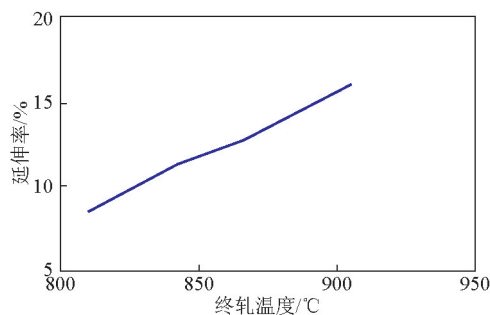


图4 终轧温度与延伸率的关系

Fig.4 The relationship of final rolling temperature and elongation

5.2 卷取温度对防弹钢性能的影响

卷取温度与强度的关系见图5,随卷取温度的升高,抗拉强度、屈服强度均下降。基于以上的结果并考虑防弹板合理的强韧性匹配,确定热轧防弹钢板B900FD的终轧温度和卷取温度见表5。

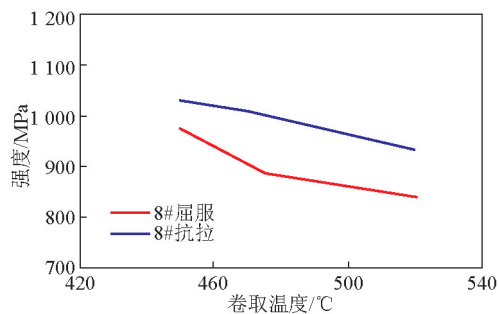


图5 卷取温度与强度的关系

Fig.5 The relationship of coiling temperature and strength

表5 热轧防弹钢板B900FD的终轧温度和卷取温度

Table 5 Final rolling temperature and coiling temperature of hot rolling bulletproof steel B900FD

终轧温度/°C			卷取温度/°C		
平均	最高	最低	平均	最高	最低
900	910	890	470	490	450

6 枪击试验

6.1 枪击试验结果

枪击试验按标准《专用运钞车防护技术条件》(GA 164—2005)的要求进行,采用微型冲锋枪,弹型为DAP51 B型7.62钢芯弹,弹头质量为5.45~5.6 g,弹速为485~515 m/s,射击距离分别为5 m、10 m、15 m,每个钢板有三个着弹点,呈三角形,距离约为

50 mm。不同射击距离的枪击试验结果见表6,距离10 m射击后的钢板照片见图6。枪击试验结果表明,热轧防弹钢板B900FD满足枪击试验的要求。

表6 不同射击距离的枪击试验结果

Table 6 Target test results of different target distance

射击距离/m	试验结果		
	着弹点状况	弹痕深度/mm	着弹点减薄量/%
5	未穿透	7.72	29.5
10	未穿透	8.85	30.1
15	未穿透	8.90	29.7

注:减薄量按公式 $A=(h_0-h_1)/h_0$ 计算, h_0 为钢板的原始厚度, h_1 为着弹点未穿透的最小厚度,测量 h_1 是用线切割沿着点中部切割开后再用游标卡尺进行测量



图6 距离10 m射击后的钢板照片

Fig.6 Steel picture after target test in distance of 10 m

6.2 防弹钢板经枪击后着弹点的变形特性分析

防弹钢板经枪击后着弹点发生隆起(见图7),隆起边缘与基板一段为变形过渡区,隆起壁为变形区,隆起顶部分为顶变形区(其大小与子弹钢芯直径相当)。图8是着弹点截面硬度随距离的测量结果,着弹点产生大的塑性变形引起强烈的加工硬化,硬度随之升高。变形过渡区主要以弯曲变形为主,变形区以拉伸变形为主,隆起顶的外层为拉伸变形,而内层为压缩变形。

图9是100倍防弹钢板的中心疏松线照片,中心疏松层位于防弹板截面的中心位置。图10为25倍下的着弹点顶部照片,可以看出:中心疏松线依然存在,而隆起顶部外侧受拉伸变形减薄。变形晶粒明显的方向性250倍照片见图11;内侧50倍晶粒轻微细化照片见图12,其厚度变形很小。从图13隆



图7 着弹点隆起截面和硬度测定点照片

Fig.7 Section of bullet wound and hardness test points

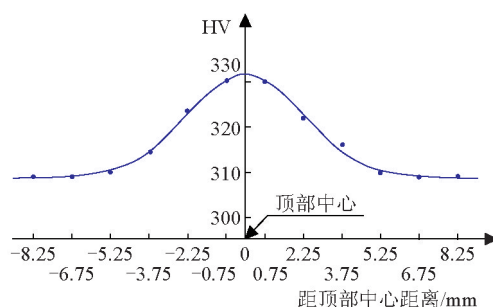


图8 着弹点变形后的硬度分布曲线

Fig.8 Hardness distribution of bullet wound after deformation

起顶部的250倍照片可以看出:中心疏松线内侧组织细密,而外侧要疏松一些,也进一步证明了隆起顶部内侧受压,外侧以拉伸变形为主。图10同时还表明着弹点最薄处不在隆起顶部,而在顶部与侧壁过渡处,该区域也是最危险的地方,当子弹打击防弹钢板时,裂纹首先在该处产生并进一步扩展,当其强度不足时,导致防弹钢板被穿透。



图9 板材中心疏松线照片

Fig.9 The loose wire in the plate

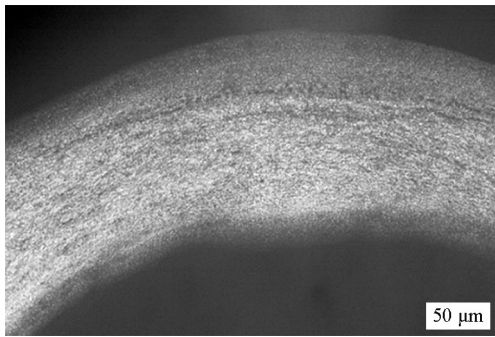


图10 着弹点顶部照片
Fig.10 At the top of bullet wound

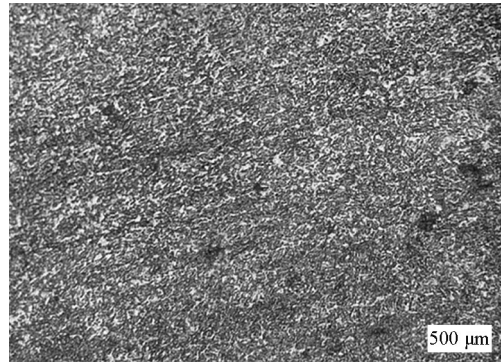


图11 隆起外侧变形晶粒照片
Fig.11 Grain outside the upheaval



图12 隆起内侧的晶粒细化照片
Fig.12 Grain refinement inside the upheaval

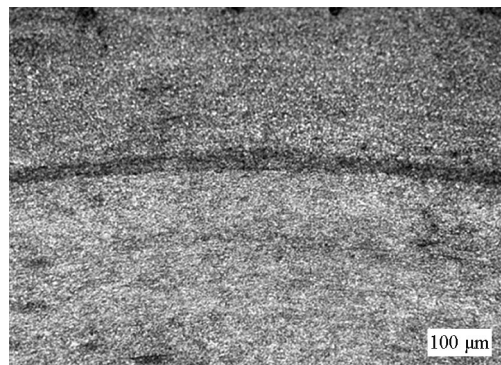


图13 隆起的顶部变形照片
Fig.13 Deformation at the top of the upheaval

从以上分析可以得知,当防弹板承受子弹的冲击时,其变形极不均匀,且十分复杂,着弹点发生隆起变形,最薄弱处在隆起顶部与隆起侧壁的过渡区。如果防弹板的屈服强度过低,则很快在该处产生塑性变形,并使该处厚度减薄,从而形成危险的减薄区,使防弹板的抗弹能力下降;而当屈服强度在一个合理范围时,可以降低该区域的塑性变形,充分发挥隆起侧壁的拉伸变形和过渡区的弯曲变形吸能作用,提高防弹钢板的抗子弹侵切能力。防弹钢板具有的这种合理的屈服强度,即为防弹钢板具备的基本防子弹侵切能力。因此,防弹钢板要有优良的防弹性能必须具有一定的抗拉强度和合适的屈服强度,并有足够的延性和韧性。

7 结语

采用微合金化复相钢开发的热轧防弹钢板B900FD,具有优良的强韧性匹配,提高了加工性能、

可焊接性,降低了成本,与国外同类产品比较具有板厚更薄、价格低的优势。钢板的相关性能指标达到了标准《专用运钞车防护技术条件》(GA 164—2005)的要求,并通过了公安部安全与警用电子产品质量检查中心的鉴定,目前已批量生产。

参考文献

- [1] 张德鹏,杜建. 防弹运钞车玻璃和钢板防弹性能的试验研究[J]. 西安交通大学学报,1998,18(4):25-27.
- [2] 魏国旗. 重型运钞车车身防弹钢板的配置[J]. 专用汽车,2004(1):17-19.
- [3] 尚善咨询. 2010—2013年中国防弹运钞车市场调研报告[R]. 四川教育出版社,2010.
- [4] 马鸣图,黎明,黄镇如. 金属防弹材料的研究进展[J]. 材料导报,2005,19:8-10.
- [5] 颜苏. 可提高抗弹性能的电渣重熔钢[J]. 兵器材料科学与工程,1984(3):23-26.
- [6] 候增寿,卢光照. 金属学原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.

The research and exploitation of the high strength hot rolling bulletproof steel

Li Zhigang¹, Ma Mingtu¹, Huang Zhenru²

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd., Chongqing 400039, China; 2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

[Abstract] This paper researched and exploited high strength hot rolling bulletproof steel B900FD. The chemical composition of B900FD was designed. The effects of different coiling temperatures on microstructure and mechanical property of bulletproof steel are discussed. The shooting test was carried out. The deformation characteristics and microstructure of the tested samples were analyzed. Cold forming and welding test were also progressed. The results show that B900FD has excellent strength and ductility compatibility. Shooting resistance property can satisfy the requirement of bulletproof steel. The machining and welding property can suit existing production process and reduce the cost. The comprehensive properties of developed B900FD steel achieve the standard of *Protection specification for cash carrying vehicles* (GA 164—2005).

[Key words] bulletproof steel; high strength; hot rolling steel

(上接39页)

Evaluation methods of vehicle lightweight

Yao Zaiqi¹, Ma Fangwu¹, Liu Qiang¹, Ma Mingtu²

(1. Zhejiang Geely Automobile Research Institute Co. Ltd., NVH & Material Engineering Division, Hangzhou 311228, China; 2. China Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd., Chongqing 400039, China)

[Abstract] The level of vehicle lightweight was not able to accurate evaluated currently, which is closely related to fuel consumption. Three kinds of evaluation methods of lightweight were obtained by analyzing typical vehicles' data in this paper: For congener vehicle, taking 4-door sedan and sport utility vehicle as examples, vehicle areal density ($L_0 = W_k/A$, W_k is curb weight, A is area of tread width times wheelbase) increases approximate linearly with increasing A . To quantitative representation, vehicle relative areal density (ΔL_m) was deduced; lightweight levels were divided to 7 grades; for different type vehicle, considering probability of passengers' number, methods of per capita lightweight coefficient was proposed; relative lightweight coefficient was presented, which has been validated by evaluation of front crossbeam assembly.

[Key words] evaluation method; vehicle areal density; per capita lightweight coefficient; relative lightweight coefficient